

VALORACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE MEZCLAS BITUMINOSAS MEDIANTE EL MODELO ECCO2

Jorge Ortiz¹, Xavier Crisén², Rodrigo Miró³, Adriana Martínez⁴

¹ ARNÓ, Lleida, España, jortiz@arno.es

² ARNÓ, Lleida, España, xavierc@arno.es

³ Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, r.miro@upc.edu

⁴ Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, adriana.martinez@upc.edu

Resumen

ARNÓ, con la colaboración de la Universidad Politécnica de Cataluña, ha desarrollado una herramienta de cálculo, denominada ECCO2, para estimar los impactos ambientales de mezclas bituminosas producidas con distintos materiales y tecnologías, y en condiciones de producción muy diversas. Permite anticipar los efectos de utilizar diferentes fórmulas de trabajo, tipos de áridos, betunes, aditivos, tasas de reciclado, temperaturas de fabricación, combustibles, rendimientos y distancias de transporte, entre otros. Se apoya en contabilidades ambientales teóricas, aunque incorpora diversas aproximaciones empíricas, cuya precisión se espera mejorar según se acumulen resultados de sucesivas mediciones efectuadas “in situ”. ECCO2 se ha basado en la metodología Análisis de Ciclo de Vida para prevenir que meros desplazamientos de cargas ambientales entre distintas etapas del ciclo de vida o procesos productivos puedan valorarse como mejoras ambientales. En la presente comunicación se describen los modelos de cálculo utilizados, las procedencias de los datos y las alternativas que pueden ser objeto de comparación. Algunas de las posibilidades al alcance de ECCO2 se ilustran con los resultados de una comparación que se propone como ejemplo. ECCO2 es una herramienta de cálculo de libre acceso a través de la web de ARNÓ (www.arno.es) o, directamente en <http://www.arno.es/es/ecco2/> desde mayo de 2019.

Palabras Clave: impactos ambientales, emisiones CO₂, análisis de ciclo de vida, mezclas bituminosas.

1 Introducción

Es indiscutible el interés de conocer o, al menos, estimar con buena aproximación, los impactos ambientales asociados a distintas alternativas de producción de mezclas bituminosas en caliente, semicalientes y templadas, tanto para los fabricantes que deseen mejorar el perfil ambiental de sus productos como para aquellos de sus clientes, administraciones públicas o privadas, que pretendan adquirir los productos más respetuosos con el medio ambiente.

Con ese fin se han desarrollado diferentes herramientas de análisis. Entre las más conocidas pueden citarse la Huella de Carbono, normalizada internacionalmente por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) con la norma 14.067:2013 o indicadores como Eco-Indicator 99 (PRé Consultants, Holanda), EPS 2000 (IVL, Suecia) o Ecopoints (BUWAL, Suiza). También pueden defenderse las soluciones ambientalmente más correctas recurriendo a las Etiquetas o Declaraciones Ambientales especificadas en las Normas ISO 14.020 14.021, 14.024 y 14.025.

En general, son más relevantes las informaciones basadas en Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una metodología concebida para identificar tanto los recursos utilizados como las emisiones, vertidos y residuos que se generan a lo largo del ciclo de vida completo de un producto. El ACV ofrece una visión de conjunto que permite identificar desplazamientos de cargas ambientales potenciales entre distintas etapas del ciclo de vida o entre diversos procesos individuales. Es una metodología promovida por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, impulsada en la Cumbre Mundial de Desarrollo Sostenible de Johannesburgo de 2002, y normalizada en la serie 14.040 a 14.044 de las Normas ISO.

Sin embargo, no siempre es sencillo utilizar rigurosamente herramientas de análisis como las citadas para clasificar las diversas alternativas de producción de mezclas bituminosas:

- La mayoría de los *eco-indicadores* se obtienen mediante la agregación de impactos o de indicadores de categoría incongruentes. A causa de esta indiscutible carga de subjetividad sólo pueden considerarse apropiados para la toma de decisiones internas en el seno de una organización o empresa. La propia norma UNE EN 14.040 establece que no deben usarse eco-indicadores para efectuar *afirmaciones comparativas* (reivindicación de la superioridad o equivalencia ambiental de un producto frente a otro que realiza la misma función) abiertas al público.
- El *etiquetado ambiental*, por su parte, presenta sus propias limitaciones: en unos casos porque se trata de auto-declaraciones voluntarias no sujetas a verificación por terceras partes (etiquetas tipo II, UNE EN 14021), y en otros porque pueden no basarse en ACV y requieren la previa existencia de distintivos emitidos por entidades competentes (etiquetas tipo I).
- En cuanto a las más completas *declaraciones ambientales de producto* (etiquetas tipo III), es preceptivo contar con unas Reglas de Categoría de Producto (RCP o PCR, de *Product Category Rules* en inglés). Se trata de documentos de carácter público, que han de recibir un consenso técnico relevante, deben aprobarse después de seguir un proceso que puede prolongarse durante varios años y que aún no se hallan disponibles en el campo de las mezclas bituminosas.

Por otro lado, aunque en el ámbito de la construcción y conservación de firmes de carretera existen ya algunas herramientas de cálculo comercialmente disponibles, su carácter genérico impide caracterizar con suficiente precisión algunas de las tecnologías utilizadas en la producción de mezclas bituminosas o ciertas variables que afectan decisivamente a sus impactos ambientales.

Finalmente, debe considerarse que los resultados de mediciones directas *in situ* no siempre se hallan disponibles, ni son útiles para aislar oportunamente los efectos de los todos los factores de influencia. Llevar a cabo análisis ambientales correctos requiere ayudarse de modelos teóricos bien desarrollados, incluso cuando se pretende sustentarlos en datos y mediciones reales. En todo caso, se considera que contar con modelos teóricos útiles para estimar los impactos ambientales de las diversas alternativas de producción disponibles o en estudio puede resultar de gran ayuda para proyectistas, fabricantes o clientes. Por este conjunto de motivos ARNÓ ha desarrollado ECCO2, una herramienta basada en Análisis de Ciclo de Vida y en los modelos de cálculo que se exponen a continuación.

2 Metodología

2.1 Definición del objetivo y el alcance

Los Análisis de Ciclo de Vida (ACV) planteados con ECCO2 son del tipo denominado “de la cuna a la puerta”, pues suman a los impactos debidos a la extracción, transformación y transporte de materias primas o secundarias, y de los productos energéticos, los de fabricación, transporte y puesta en obra de las mezclas bituminosas: se trata de comparar alternativas de las que se esperan similares comportamientos en servicio durante una misma vida útil. La Norma UNE-EN 14.040 prevé la posibilidad de emplear la metodología ACV en estudios que no se extienden a toda la vida esperada del producto. Bajo la hipótesis indicada, se trata de un planteamiento que no resta valor a las conclusiones que se desprendan de los análisis.

Se han considerado procesos externos al sistema, prescindiéndose de su contribución a los ACV, los correspondientes a la manufactura de instalaciones, de la central de fabricación de mezclas bituminosas, y de la maquinaria y vehículos utilizados en su producción, transporte y puesta en obra. Tampoco se contabilizan las eventuales aportaciones de procesos vinculados a actividades de mantenimiento, reparación o sustitución de material de desgaste de esos equipos.

Las entradas consideradas son *flujos de producto* y *flujos elementales*. Las salidas son *flujos elementales* y la *capa bituminosa completamente terminada* y en condiciones de uso. La expresión *flujos elementales* hace referencia a flujos de entrada que no han sufrido transformación por el hombre y de

salida que no sufrirán transformaciones posteriores. Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida se obtienen para la unidad funcional una tonelada (1 t) de mezcla bituminosa puesta en obra aunque, naturalmente, pueden referirse a cualquier otra cantidad o una cierta superficie de pavimento, contando con los datos de densidad y espesor de la capa terminada.

2.2 Análisis del inventario

El *Análisis del Inventario* o recopilación de los datos y definición de los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema del producto, comprende, generalmente la utilización de diversas bases de datos y fuentes de información ajenas, además de informaciones, estimaciones y cálculos propios. En la tabla 1 se recogen las procedencias de los datos de Inventario de Ciclo de Vida (ICV) utilizados en ECCO2. Siempre que ha sido posible se ha recurrido a bases de datos reconocidas, de acceso público y representativas de los modos de producción que se trata de analizar. También se han efectuado *elaboraciones propias* (datos obtenidos mediante ajustes, deducciones, o suma de datos procedentes de ICV externos).

Las entradas y salidas de cada uno de los subprocesos, y de los procesos unitarios considerados, se han obtenido mediante modelos de cálculo propios. La figura 1 es un diagrama de flujo que permite identificar los subprocesos que se resuelven mediante la asignación de datos de inventario y los que han requerido desarrollar modelos de cálculo propios. Estos últimos responden a los siguientes planteamientos:

Proceso unitario 1: Materias primas y su transporte:

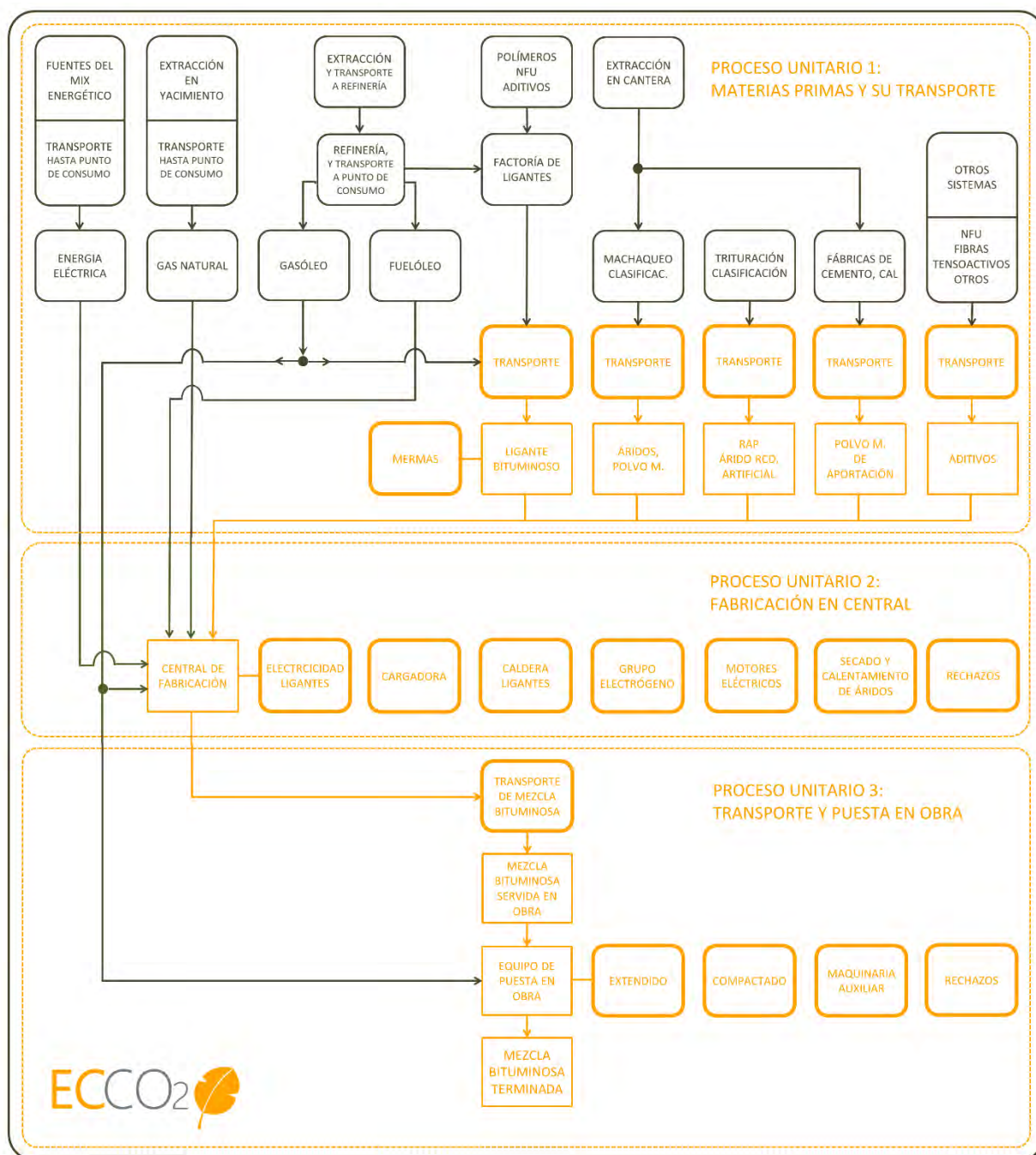
- El consumo de cada fracción de árido natural o artificial se obtiene de las respectivas proporciones ponderales establecidas en la dosificación en frío y de las mermas previstas durante las operaciones de transporte y acopio, en su caso.
- Los consumos de betún, emulsión, RAP y resto de adiciones, según las respectivas proporciones ponderales previstas en la fórmula de trabajo.
- El consumo de gasóleo correspondiente al transporte de cada materia prima o secundaria es función de la distancia de transporte y de la carga neta y consumo unitario de combustible asignado a los vehículos de transporte, que depende, a su vez, del tipo de motorización considerado (convencional, Euro I, II, III, IV ó V).

Proceso unitario 2: Fabricación en central

- Los rechazos en la central de fabricación se obtienen por diferencias entre las dosificaciones en frío y en caliente
- Los consumos de energía eléctrica de la red, o de gasóleo en grupos electrógenos y calderas, según sea el caso, se deducen las potencias instaladas y de la estimación de horas de funcionamiento de cada equipo. ECCO2 asigna, por defecto, las potencias correspondientes en función de la capacidad de la central de fabricación y del tipo de fuente considerada.
- El consumo de gasóleo de la pala cargadora se deduce de su potencia, horas de utilización y tipo de motor (Stage I, II, IIIA, IIIB, IV y V).
- La demanda energética que debe satisfacerse para el secado y calentamiento de los áridos se obtiene de la variación de entalpía de los componentes de la mezcla bituminosa y de las pérdidas de calor calculadas (en la chimenea, por radiación y conducción, debidas al calor invertido en el calentamiento de la propia central).

Tabla 1. Procedencia de los datos de inventario de ciclo de vida

Producto	Fuentes de los datos de inventario
Áridos clasificados	ECOINVENT [1] y EPLCA [2]
Áridos triturados	ECOINVENT [1] y EPLCA [2]
Áridos reciclados	CAVIT 2002 [1]
Áridos siderúrgicos	CAVIT 2002 [1]
RAP sin tratamiento	Solo impactos asociados a su transporte
RAP solo clasificado	Elaboración propia a partir de ECOINVENT y Stripple [3]
RAP triturado y clasificado	Elaboración propia, a partir de datos de ECOINVENT
Betún de penetración ⁴ , t	EUROBITUME [4]
Betunes modificados con polímeros	EUROBITUME para PMB 45/80-65. Elaboraciones propias basadas en EUROROBITUME en otros betunes modificados.
Betunes mejorados con caucho	Elaboraciones propias basadas en EUROBITUME
Betunes modificados con caucho	Elaboraciones propias basadas en EUROBITUME
Betunes de alta viscosidad con caucho	Elaboraciones propias basadas en EUROBITUME
Emulsiones	EUROBITUME
Emulsiones modificadas	EUROBITUME y elaboración propia
Cemento	EPLCA
Cal viva	EPLCA
Hidróxido cálcico	Elaboración propia basada en Cal viva de EPLCA
Fibras de celulosa	Shen y Patel [5]
Zeolitas sintéticas	Fawer [6]
Polvo de NFU	Solo impactos asociados a su transporte
Gasóleo calderas	ENERTRANS [7], Inventarios Nacionales del MITECO, CORINAE, CONCAWE, IPPC y EPA [8], elaboraciones propias.
Gasóleos vehículos de carretera	ENERTRANS, EMEP-EEA [9]
Gasóleos maquinaria de obra, grupos.	ENERTRANS, NRMM [10]
Fuelóleo ⁵	ENERTRANS, Inventarios Nacionales del MITECO, CORINAE y EPA [8], y elaboraciones propias.
Gas natural ⁵	ENERTRANS, Inventarios Nacionales del MITECO, CORINAE y EPA, y elaboraciones propias.
Energía eléctrica ⁵	MINETUR [7] , EURELECTRIC [8], elaboraciones propias



LEYENDA



Datos obtenidos o deducidos de ICV externos.



Resultados obtenidos con los modelos de cálculo ECCO2



Recopilaciones de resultados

Figura 1. Diagrama de flujo utilizado para describir los procesos en ECCO2

La figura 2 ilustra el planteamiento de los balances térmicos desarrollados para obtener la demanda de combustible. Aunque en el interior del recuadro *Central de fabricación* se han tratado de representar los flujos correspondientes a una cierta tipología de central, es importante tener en cuenta que, puesto que la entalpía es una función de estado, su variación depende solo de las condiciones iniciales y finales

del sistema analizado. La configuración de la central, pues, no afecta a la validez del modelo mientras las pérdidas de calor y la humedad residual presente en la mezcla bituminosa a la descarga de la central, se estimen con suficiente aproximación. Por el contrario, como puede comprobarse analizando rigurosamente los modelos simplificados habitualmente usados para defender el interés de ciertas mezclas bituminosas a bajas temperaturas, prescindir de las pérdidas de calor, o de las evaporaciones de agua que tienen lugar en elementos de la central distintos del tambor secador, conduce a obtener resultados erróneos [11].

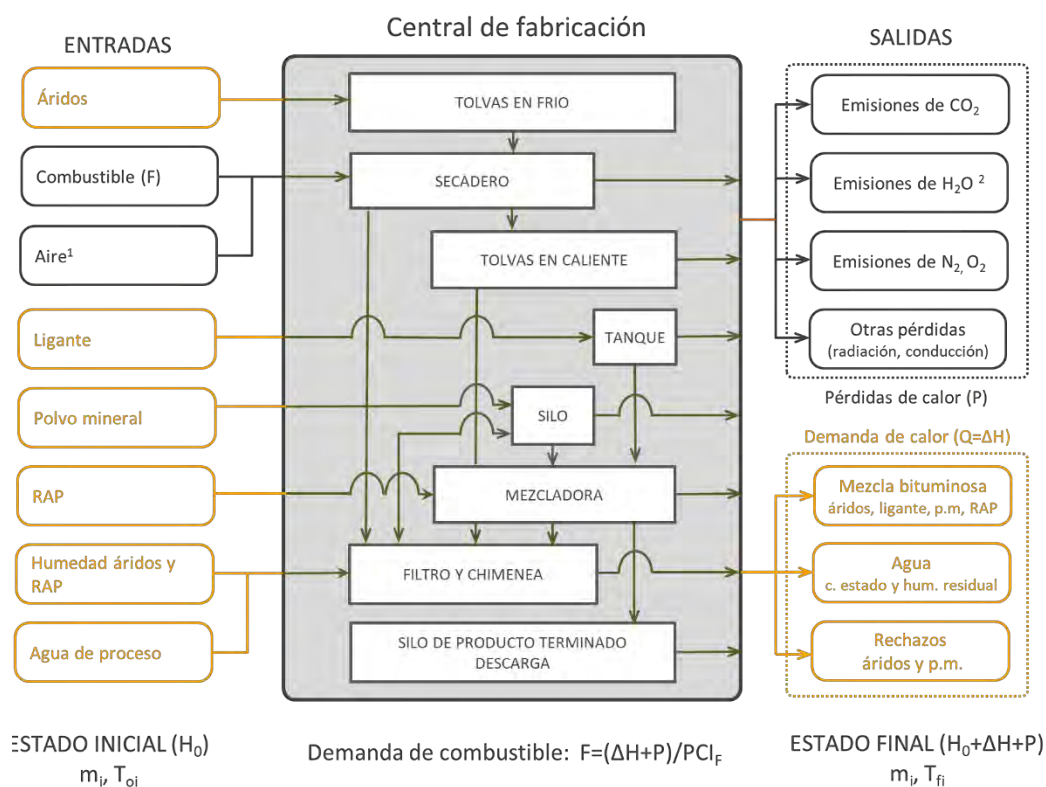


Figura 2. Diagrama de flujo para demanda de combustible

ECCO2 propone una aproximación empírica a las pérdidas de calor por radiación, conducción y calentamiento de la propia central y un modelo para estimar la humedad residual de la mezcla bituminosa en función de la temperatura de fabricación.

Proceso unitario 3: transporte y puesta en obra de la mezcla bituminosa.

- Al igual que para el transporte de materias primas, el consumo de gasóleo correspondiente al transporte de mezcla bituminosa de central a obra se obtiene de la distancia de transporte, carga neta y consumo unitario de combustible asignado a los vehículos de transporte, que depende a su vez, del tipo de motorización (convencional, *Euro I, II, III, IV ó V*)
- El consumo de gasóleo de los equipos de puesta en obra, como el de la pala cargadora en la central de fabricación, se deduce de sus respectivas horas de utilización, su potencia y tipo de motor (*Stage I, II, III A, III B, IV ó V*).

Las bases de datos de ECCO2 también incluyen los *calores específicos* de áridos naturales y artificiales, betún, agua líquida y en forma de vapor, oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y acero, el *poder calorífico inferior* (PCI) de gasóleo, fuelóleos y gas natural, las *estequiometrias de las reacciones de combustión* y las *proporciones de aire en exceso sobre el estequiométrico* típicamente utilizadas en las centrales de fabricación, tomadas de diversas fuentes [2, 4, 13] o procedentes de mediciones y estimaciones propias.

2.3 Evaluación de impacto e interpretación de resultados

La fase de *Evaluación de Impacto* consiste en la asociación de los resultados de inventario, expresados como flujos elementales, con categorías de impactos ambientales. En general, interesa seleccionar suficientes categorías para no prescindir de valorar impactos ambientales relevantes pero, por otra parte, conviene que su número sea reducido para prevenir interpretaciones de resultados excesivamente complejas.

La versión actual de ECCO2 ofrece la posibilidad de obtener resultados en las siguientes ocho categorías de impacto: *Consumo de Materias Primas Totales*, *Agotamiento de Recursos Abióticos*, *Demanda Acumulada de Energía*, *Indicador de Cambio Climático*, *Acidificación*, *Eutrofización*, *Formación de Oxidantes Fotoquímicos*, y *Uso de Residuos*. Esta última se obtiene de restar al consumo de materias primas totales la diferencia entre residuos utilizados y residuos generados. Se ha creado para reconocer, como mejora ambiental de interés, su eventual reducción. Los factores de caracterización utilizados en las diferentes categorías de impacto se han tomado de TEAM, ADF e IPPC [12].

ECCO2 permite optar por una representación sencilla, en forma de histograma, de los resultados obtenidos en las categorías seleccionadas por el usuario, o bien por una representación en forma de gráfico radial de los resultados correspondientes a todas las categorías. Pueden compararse hasta cuatro distintas alternativas de fabricación de forma simultánea. No se proponen agrupaciones ni sumas incongruentes aunque, en los gráficos que reúnen distintos indicadores de categoría, se utilizan escalas arbitrarias elegidas de modo que todos los resultados aparezcan incluidos en los rangos representación previstos.

Finalmente, es el propio usuario quien debe interpretar los resultados obtenidos para elegir la opción ambientalmente más correcta. Se considera improbable que elevar el número de categorías de impacto analizadas lleve a conclusiones distintas de las que pueden obtenerse con la valoración de las ocho categorías propuestas en ECCO2 o incluso con solo una parte de ellas, si se efectúa una selección adecuada.

2.4 Funcionamiento de la herramienta de cálculo

Mediante ECCO2 se ha sistematizado la recopilación de datos, introducción de variables, resolución de ecuaciones y presentación de resultados de los análisis.

En su versión actual, ECCO2 utiliza hasta un total de 92 variables de producción. El usuario puede asignar valores a 75 de ellas mientras que el resto son variables dependientes o se han determinado por defecto. En conjunto, permiten distinguir los efectos ambientales de temperatura ambiente y humedad de los áridos, distintos tipos de áridos y ligantes bituminosos, uso de residuos y de aditivos, fórmulas de trabajo, fuentes de energía de la central, temperatura de la mezcla bituminosa, rendimientos de fabricación y puesta en obra, composición y características de los equipos de maquinaria y distancias de transporte, entre otras.

La introducción de datos se efectúa mediante los tres formularios reproducidos en las figuras 3, 4 y 5, que combinan listas desplegadas con celdas donde deben introducirse valores numéricos. Al abrirse por primera vez, cada formulario muestra, en todos sus campos, selecciones y valores establecidos por defecto, con el fin de simplificar la introducción de datos. Los resultados pueden imprimirse en distintos formatos, en función del número de categorías de impacto en estudio. Una vez iniciados los cálculos, el usuario puede desplazarse entre formularios conservando los datos más recientes, y guardando datos y resultados si así lo indica en el formulario final (figura 6).

En la versión de ECCO2 actualmente disponible en el sitio web www.arno.es únicamente se encuentra habilitada la categoría de impacto “Indicador de cambio climático” (ICC) o huella de carbono. Se ha previsto incluir el resto de categorías en sucesivas versiones, donde también podrán sustituirse las predicciones proporcionadas por los modelos de pérdidas de calor o de estimación de humedad residual por datos obtenidos de mediciones reales.

Materias primas y su transporte



Materias primas
Fabricación
Puesta en obra
Cálculos

Dosificación en frío

	Naturaleza	Proporción (%)	Distancia
Árido fino 1	Árido triturado	40 s/a	5 km
Árido fino 2	Árido no triturado	10 s/a	15 km
Árido grueso 1	Árido triturado	20 s/a	60 km
Árido grueso 2	Árido triturado	20 s/a	60 km
Mermas en acopios o transporte		3 s/a	

Dosificación en caliente

	Naturaleza	Proporción (%)	Distancia
Polvo mineral de aportación	PM calizo	2 s/a	110 km
Aditivo 1	NO	0 s/m	110 km
Aditivo 2	NO	0 s/betún	90 km
RAP	RAP clasificado	10 s/m	15 km
Betún en el RAP		4 s/m	
Betún residual en el ligante bituminoso		100 s/m	
Proporción del betún total en la mezcla		5 s/m	
Betún nuevo añadido a la mezcla	PMB 45/80-65	4.6 s/m	160 km

Transporte de las materias primas

	Estándar del motor	Carga neta	Consumo (100km)
Motorización de los vehículos	Euro I	25 t	30.1 l

Figura 3. Formulario para introducción de datos relacionados con las materias primas

Fabricación en central



Materias primas
Fabricación
Puesta en obra
Cálculos

Condiciones y tiempos de producción

Altitud m.s.n.m	<500	Horas de funcionamiento diario	6 h
Capacidad	220 t/h	Funcionamiento ininterrumpido	2 h
Producción media diaria	800 t	Actuación sistema calentamiento	4 h/d

Fuentes de energía y equipos

	Fuente	Modelo CAT o similar
Quemador del secadero	Fuelóleo	Pala cargadora CAT 950 M
Motores de la central	Grupo electrógeno	Estándar del motor
Calentamiento de ligantes	Caldera de fuelóleo	Pala cargadora Stage II (Tier 2)
Grupo electrógeno	Gasóleo	Grupo electrógeno Convencional

Humedades y agua de proceso

	Selección *	
Árido fino 1	<input type="radio"/>	2.5 % s/a
Árido fino 2	<input type="radio"/>	2.5 % s/a
Árido grueso 1	<input type="radio"/>	1 % s/a
Árido grueso 2	<input checked="" type="radio"/>	1 % s/a
RAP	<input type="radio"/>	5 % s/a
Agua de proceso		0 % s/a
Humedad residual		0 % s/m

Temperaturas

Ambiente	20 °C
Áridos	15 °C
RAP	15 °C
Ligante bituminoso	150 °C
Agua de proceso	15 °C
Gases	115 °C
Mezcla bituminosa	165 °C

* Seleccionar la fracción introducida directamente en la mezcladora, en su caso, o bien "NO".

Figura 4. Formulario para introducción de datos relacionados con la fabricación en centra

Transporte y puesta en obra



Materias primas
Fabricación
Puesta en obra
Cálculos

Condiciones de la puesta en obra

Distancia de central a obra	60	km	Espesor de capa	50	mm
Rendimiento diario	800	t/d	Densidad de la capa compactada	2.4	t/m ³
Mermas de puesta en obra	2.5	s/m	Unidad Funcional	1	t

Condiciones de la puesta en obra

	Tipo	Potencia	Uso diario
Silo de transferencia	ROAD SB2500	233 kW	8 h
Extendidora 1, Vögele o similar	SUPER 1900	150 kW	
Extendidora 2, Vögele o similar	NO	- kW	
Compactador tandem 1, Dynapac o similar	CC 4200	97 kW	
Compactador tandem 2, Dynapac o similar	NO	- kW	
Compactador tandem 3, Dynapac o similar	NO	- kW	
Compactador de neumáticos 1	24 - 30 t	90 kW	
Compactador de neumáticos 2	NO	- kW	
Compactador de neumáticos 3	21 - 24 t	74 kW	
Fresadora, Wirtgen o similar	W100 Ri	160 kW	
Barredora, Bobcat o similar	S 510	36.4 kW	4 h

Motorización de vehículos y maquinaria

Vehículos de transporte	Euro II	Maquinaria	Stage II (Tier 2)
-------------------------	---------	------------	-------------------

Figura 5. Formulario para introducción de datos relacionados con el transporte y puesta en obra

Cálculo y presentación de resultados



Identificación

Denominación de la opción en cálculo

Alcance del estudio

Categoría de impacto	Unidad	Selección
Materias primas totales	kg	<input type="checkbox"/>
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq.	<input type="checkbox"/>
Demanda acumulada de energía	MJ	<input type="checkbox"/>
Indicador de cambio climático	kg CO ₂ eq.	<input checked="" type="checkbox"/>
Acidificación	Mol H ⁺ eq.	<input type="checkbox"/>
Eutrofización	g PO ₄ eq.	<input type="checkbox"/>
Formación de oxidantes	g etileno eq.	<input type="checkbox"/>
Recuperación de residuos	kg	<input type="checkbox"/>

Presentación de resultados

Histograma y variables (una categoría) ☒

Histograma ampliado (dos o más categorías) ☐

Gráfica radial (sólo para tres o más categorías) ☐

Calcular y guardar

Guardar configuración Alternativa 1

Resultados

Figura 6. Formulario para establecer la forma de presentación de resultados

3 Resultados

Algunas de las posibilidades ofrecidas por ECCO2 se ilustran en este epígrafe con los resultados que se presentan a continuación, referidos a la producción de una misma mezcla bituminosa en distintas condiciones.

La comparación presentada se refiere a una misma mezcla tipo AC16 S PMB 45/80-65 producida según las cuatro distintas condiciones de producción descritas a continuación. Los valores asignados a las variables no especificadas son idénticos en todos los casos y la unidad funcional es una tonelada (1 t) de mezcla bituminosa puesta en obra.

- **Referencia:** Corresponde a las condiciones establecidas por defecto en los formularios de introducción de datos: distancias medias de transporte de áridos y mezcla bituminosa, utilización de un 10% RAP, y áridos de humedades moderadas. La central utiliza fuelóleo como combustible en el tambor secador, y gasóleo en la caldera y en un grupo electrógeno. La temperatura de la mezcla a la descarga sobre los vehículos de transporte es de 165° C.
- **Alternativa 1:** Representa la producción de la misma mezcla, en idénticas condiciones, modificando únicamente la temperatura de fabricación (ahora 130° C) recurriendo a procedimientos de reducción de temperatura, o a la incorporación de aditivos, que no añadan cargas ambientales de ciclo de vida.
- **Alternativa 3:** Es la opción ambientalmente más desfavorable de las comparadas, y consiste utilizar áridos de humedades más elevadas, cemento como polvo mineral de aportación y ninguna proporción de RAP. Además se ha supuesto una elevada distancia de transporte de la mezcla y bajos rendimientos de puesta en obra.
- **Alternativa 4:** corresponde a la alternativa más favorable entre las comparadas. Se ha supuesto ahora que la central de fabricación se encuentra en el propio lugar de procedencia de los áridos y, con relación a la mezcla de referencia, más próxima a la obra. También que las humedades de áridos y RAP son menores, la tasa de reciclado es más elevada (30%), la temperatura de fabricación es, de nuevo, de 130° C y el rendimiento de puesta en obra mayor.

ECCO2 presenta los resultados gráficamente (figura 7) y en forma de una tabla donde se recopilan los valores de las variables utilizados en cada cálculo, con el fin de facilitar el análisis de sus efectos y la comparación de alternativas.

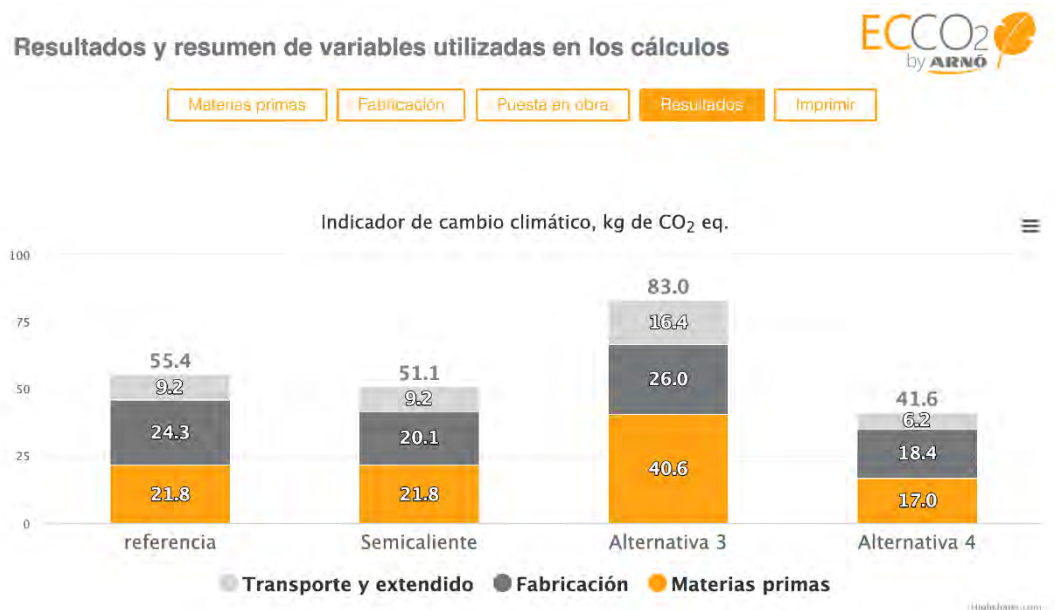


Figura 7. Presentación de resultados en forma gráfica

4 Conclusiones

Con ECCO2 se ha tratado de poner a punto un modelo sencillo, verificable y reproducible, para facilitar el análisis de los efectos ambientales de las principales variables relacionadas con la producción de mezclas bituminosas en caliente, semicalientes y templadas.

Desde mayo de 2019 puede accederse libremente a una primera versión de esta herramienta de cálculo, habilitada para el análisis de la categoría ambiental *Indicador de Cambio Climático* (expresada como kg de CO₂ eq.), a través de la página web www.arno.es. Se espera que sirva de base a futuras actualizaciones que mejoren su aproximación empírica. Por ejemplo, algunos de los coeficientes de pérdidas utilizados en el modelo actual pueden requerir ajustes cuando se trate de analizar mezclas bituminosas producidas en centrales de fabricación con configuraciones distintas de las consideradas, pues ECCO2 se ha basado en resultados obtenidos con las tipologías disponibles en ARNÓ, centrales discontinuas de producciones comprendidas entre 160 y 280 t/h. También las estimaciones de humedad residual en la mezcla bituminosa, actualmente relacionada de forma lineal con la temperatura de descarga sobre los camiones son, sin duda, susceptibles de ser mejoradas, mediante modelos más complejos o introduciendo resultados de mediciones reales en lugar de los valores proporcionados por el modelo actual.

Aún en su versión actual, en cualquier caso, se considera que ECCO2 es una herramienta que puede resultar útil tanto a usuarios interesados en prever los efectos ambientales de innovaciones en materiales, diseños o procedimientos de producción, como a los fabricantes que deseen conocer los principales factores de influencia en los impactos ambientales de ciclo de vida de sus productos.

ECCO2 mejora la precisión de estudios anteriores, en particular, de algunos de los más divulgados entre los dirigidos a comparar la demanda energética de mezclas bituminosas en caliente, semicalientes y templadas. Específicamente, los resultados de ECCO2 se obtienen tomando en cuenta aspectos despreciados en estudios alternativos, como evaporaciones y pérdidas de calor que tienen lugar en elementos de la central distintos del tambor secador, así como la humedad residual de las mezclas bituminosas. Se trata de influencias de las que no puede prescindirse sin incurrir en riesgo de efectuar contabilidades ambientales erróneas y de clasificar incorrectamente los efectos de tecnologías de producción alternativas, según sus impactos ambientales de ciclo de vida.

5 Agradecimientos

ARNÓ inició en 2017 un proyecto de investigación denominado ASFALTMIN (Mezclas Asfálticas de mínimas emisiones y demanda energética), con la ayuda de CDTI, Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial del Ministerio de Economía y Competitividad. El presente estudio, junto con el desarrollo de la herramienta de cálculo ECCO2 ha constituido su primera actividad. Los autores desean agradecer a CDTI la ayuda prestada.

6 Referencias

- [1] Blengini, G.; Garbarino, E.; Zavaglia, K.; *Sustainability evaluation of natural and recycled aggregates through Life Cycle Assessment*. Journal of Cleaner Production, 2012.
- [2] EPLCA, European reference Life Cycle Database. Joint Research Centre. European Commission.
- [3] Stripple, H.; TRIPPLE, H. *Life Cycle Assessment of Road. A pilot study for inventory analysis*. Second revised edition. Report from IVL Swedish Environmental Research Institute. March 2001, Gothenburg, Sweden.
- [4] Blomberg, T., et al. (2012). *Life Cycle Inventory: Bitumen (2nd Edition)*. EUROBITUMEN, European Bitumen Association.
- [5] Shen, L.; Patel, M.; *Life Cycle Assessment of man-made cellulose fibres*. Lenzinger Berichte 88 (2010) 1-59.
- [6] Fawer, M.; Postlethwaite, D.; Klüppel, H.; *Life Cycle Inventory for the production of zeolite A for detergents*. The International Journal of Life Cycle Assessment 3 (2), 1998.
- [7] DGA; *Guía para la aplicación de una valoración ambiental de las alternativas disponibles en los proyectos de construcción y conservación de carreteras de acuerdo con la estrategia aragonesa de cambio climático y energías limpias*. Dirección General de Calidad Ambiental. Gobierno de Aragón. 2016.

- [8] JA *Guía de apoyo para la notificación de las emisiones en las centrales térmicas y otras instalaciones de combustión de la Junta de Andalucía*. Diciembre 2018.
- [9] EMEP/EEA; *Air pollutant emission inventory guidebook 2016*. Update Jul. 2018. European Environment Agency.
- [10] NRMM *Non-Road mobile machinery emissions*. European Commission, NRMM Regulation
- [11] Ortiz, J.; Crisén, X.; *Temperaturas, consumos energéticos y emisiones de mezclas bituminosas en caliente, semicalientes y templadas*. XIII Jornada Nacional de ASEFMA. Madrid, mayo de 2018.
- [12] Antón, M. A.; *Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Projectes d'Enginyeria, 2004.
- [13] NAPA; *The fundamentals of the operation and maintenance of the exhaust gas system in a hot mix asphalt facility*. National Asphalt Pavement Association (NAPA). IS 52, 1987.